

# Олимпиадный эксперимент – в школьный практикум

---

**КПК, Физтех**  
**июнь, 2017**

**Часть II**

*Алексей Гуденко*  
*к.ф.м.н.,*  
*доцент кафедры общей физики*  
*МФТИ,*  
*[a.v.gudenko@gmail.com](mailto:a.v.gudenko@gmail.com)*

---

**Все задачи в предлагаемой  
презентации - авторские**

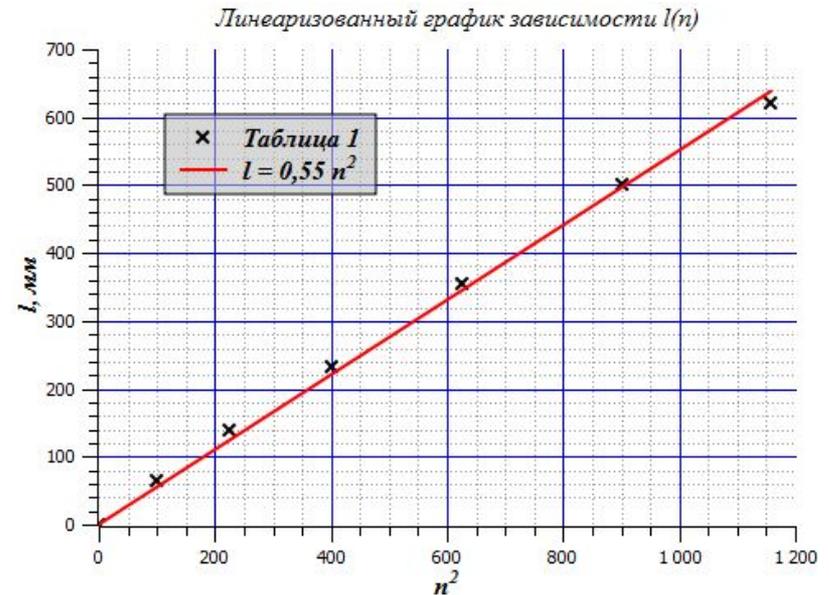
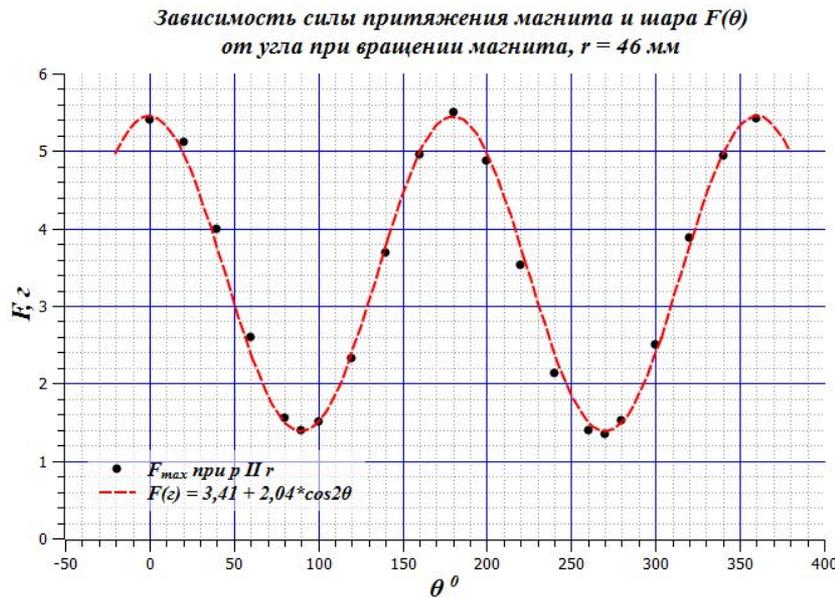
---

# Полезные сайты

---

- Олимпиадная школа МФТИ, курс «Экспериментальная физика»:  
<http://edu-homelab.ru>
  - Международная олимпиада по экспериментальной физике (IEPhO):  
<http://iepho.com>
  - Информационный сайт Всероссийской олимпиады по физике:  
<http://4ipho.ru>
-

# Обработка результатов, графики



□ Все графики оформлены с помощью программы SciDavis  
<http://scidavis.sourceforge.net>

# Наши планы

---

- **Магнитные явления. Постоянные магниты в школьном лабораторном практикуме**
    - **Красивые демонстрации: униполярный двигатель; диамагнитная левитация**
    - **Лабораторная работа «Магнитное торможение»**
    - **Магнитные шары. Немного теории: магнитный диполь, основные формулы.**
    - **Лабораторная работа «Сила сцепления магнитных шаров»**
    - **Лабораторная работа «Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли»**
    - **Лабораторная работа «Определение вертикальной составляющей магнитного поля Земли. Магнитное наклонение»**
-

# Униполярный двигатель

---



# Диамagnetная левитация

---

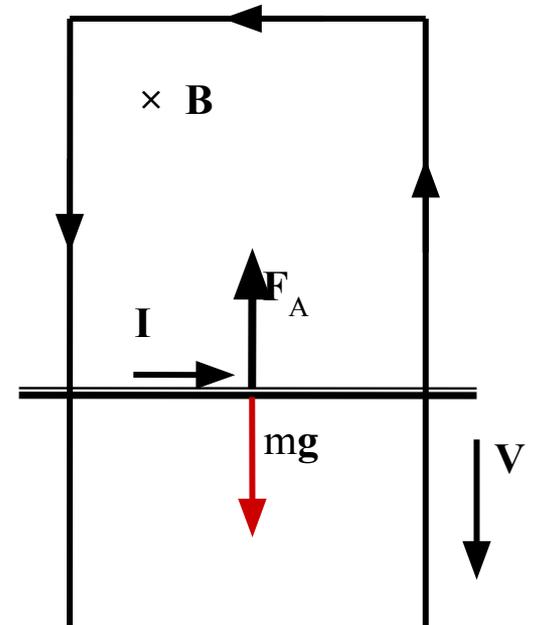


# Лабораторная работа № 1.

## Магнитное торможение

- Механизм магнитного торможения, численные оценки.
- Индукционный ток:  
 $I = B\ell V/R$
- Сила Ампера:  
 $F_A = IB\ell = B^2\ell^2 V/R$
- $F_c = -\beta V$ ,  $\beta = B^2\ell^2/R$
- Установившаяся скорость:  
 $F_c = mg \Rightarrow (B^2\ell^2/R)V = mg$
- $R = \rho_q \ell/S$ ;  $m = \rho_m \ell S \Rightarrow$

$$V = \rho_q \rho_m g / B^2 \sim 2 \text{ см/с !}$$



$$\rho_q \sim 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом м } \{R(5 \text{ км}; 1 \text{ см}^2) = 1 \text{ Ом}\};$$

---

$$\rho_m \sim 8 \text{ г/см}^3; B \sim 0,3 \text{ Тл}$$

# Цель работы.

---

- В работе экспериментально определяются:
    1. коэффициенты трения покоя  $\mu_0$ ;
    2. коэффициент трения скольжения;
    3. коэффициент магнитного торможения  $\beta$ .
-

# Оборудование

---

- Алюминиевый желоб; штатив с лапкой; восемь одинаковых неодимовых магнитов в виде параллелепипедов (магниты намагничены параллельно своей самой короткой стороне); секундомер; линейка (рулетка); весы.
-

# теория

---

- Закон Ньютона:  
 $ma = mgsina - \mu mg \cos a - \beta V.$
  - Установившаяся скорость ( $a = 0$ ):  $V = (mg/\beta) (sina - \mu \cos a)$
  
  - Линеаризованная зависимость:  **$V/\cos a = mg/\beta(tga - \mu)$**
  - $y = V/\cos a, x = tga.$   
 $y = mg/\beta (x - \mu)$
  - График этой зависимости – прямая линия.
  - Отсечка на оси X  
 $x_0 = \mu,$   
угловой коэффициент:  
 $tg\varphi = dy/dx = mg/\beta$
  - Физический смысл углового коэффициента –  
установившаяся скорость магнита при скольжении по  
вертикальной плоскости  
 $V_{\text{верт}} = mg/\beta.$
-

# Эксперимент. Таблица № 1, t(S)

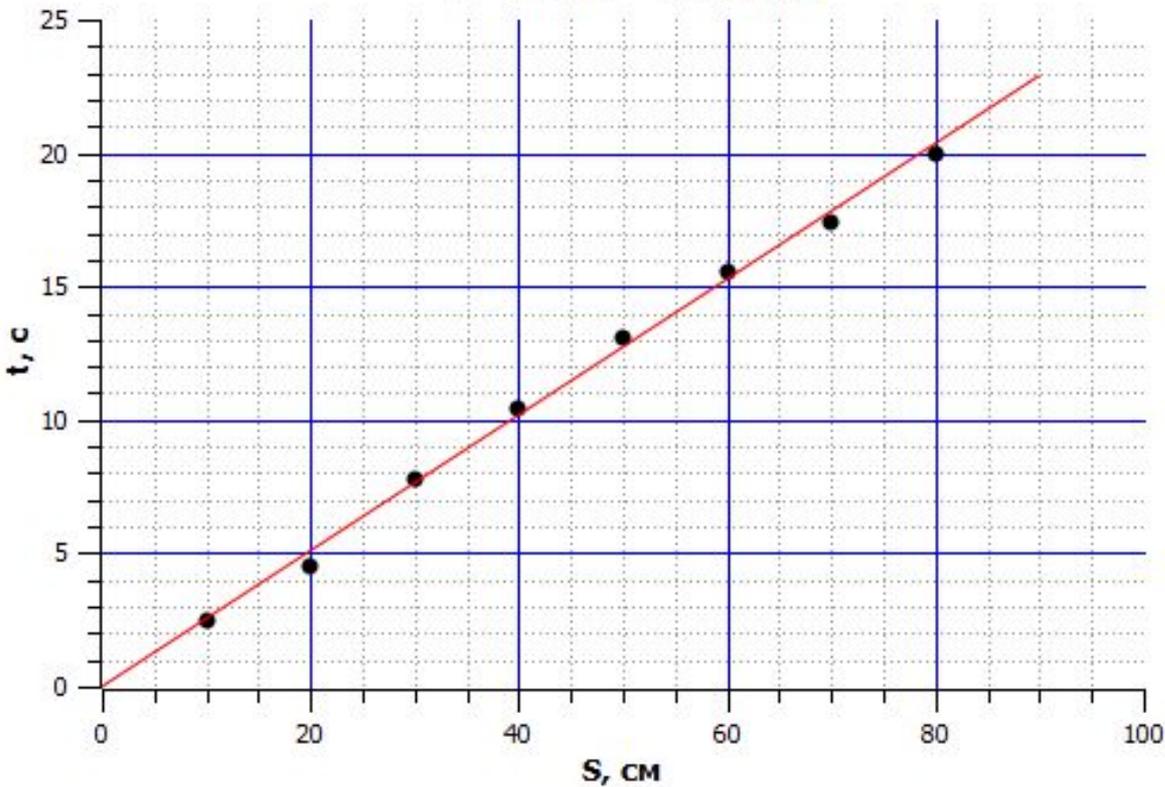
---

|               |     |      |      |       |       |       |       |       |
|---------------|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| S, см         | 10  | 20   | 30   | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    |
| t, с          | 2,4 | 4,53 | 7,73 | 10,38 | 13,08 | 15,57 | 17,44 | 19,96 |
| $a = 37,30^0$ |     |      |      |       |       |       |       |       |

---

# График $t(S)$ . Выводы

Зависимость времени от длины пути  $t = 0,254 S$ ;  
 $a = 37,3$ ;  $V = 3,94$  см/с



- $t \sim S$
- Движение магнита равномерно
- Путь разгона мал

## Эксперимент.

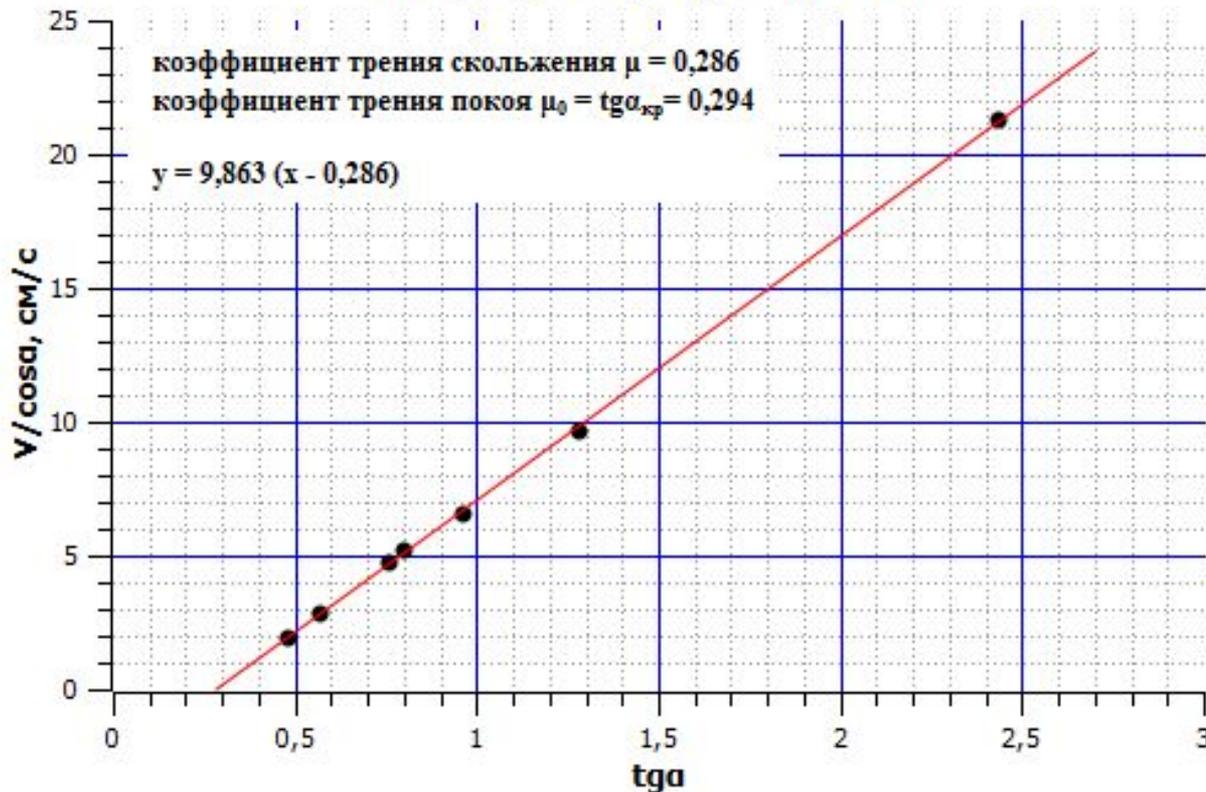
### Таблица № 2. Зависимость $v(\alpha)$

| $\alpha^{\circ}$   | $t, \text{ c}$ | $V, \text{ см/с}$ | $x = \text{tga}$ | $y = v/\cos\alpha, \text{ см/с}$ |
|--|----------------|-------------------|------------------|----------------------------------|
| 25,6   | 45,9           | 1,74              | 0,479            | 1,93                             |
| 29,6   | 32,4           | 2,47              | 0,568            | 2,84                             |
| 37,3   | 21,2           | 3,77              | 0,762            | 4,74                             |
| 38,7   | 19,9           | 4,01              | 0,801            | 5,14                             |
| 43,9   | 16,9           | 4,73              | 0,962            | 6,56                             |
| 52,0   | 13,45          | 5,95              | 1,280            | 9,66                             |
| 67,7   | 9,9            | 8,08              | 2,435            | 21,30                            |
| $S = 80 \text{ см}$ $m = 8,5 \text{ г}$ $\mu = 0,286$ $\beta = 0,845 \text{ кг/с}$ |                |                   |                  |                                  |

# Линеаризованный график $v(\alpha)$ : $v/\cos\alpha = mg/\beta (\operatorname{tg}\alpha - \mu)$

$$V/\cos\alpha = mg/\beta (\operatorname{tg}\alpha - \mu)$$

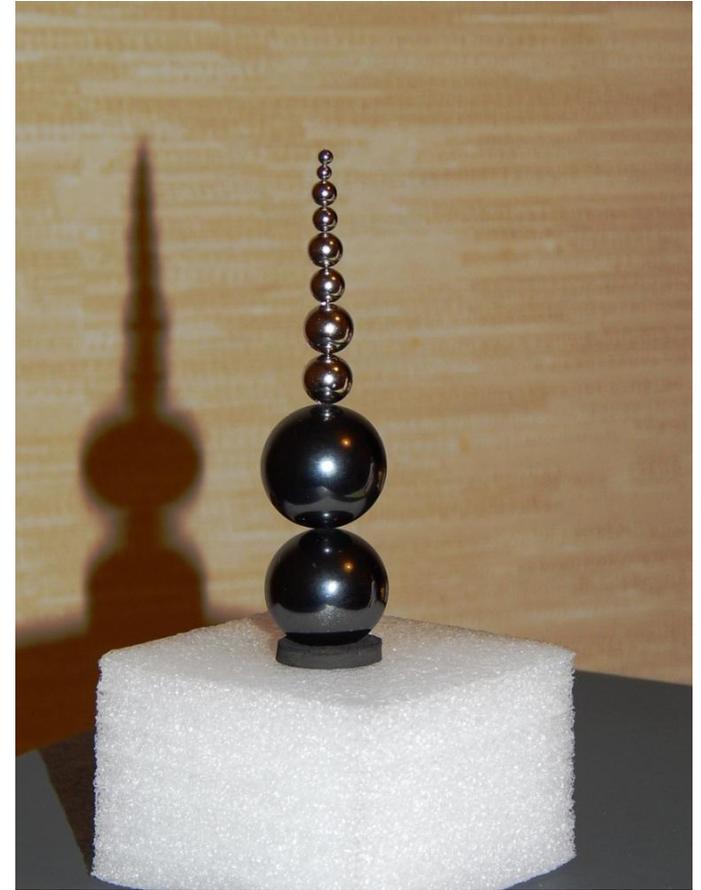
$$m = 8,5 \text{ г}; \mu = 0,286; \beta = 0,845 \text{ кг/с}$$



# Лабораторная работа

## **Закон взаимодействия магнитных шаров**

---



# Необходимые сведения

---

- Индукция поля **B** точечного магнитного диполя **P<sub>m</sub>** на расстоянии **r** от диполя (система СИ):

$$\mathbf{B} = \mu_0/4\pi \{3(\mathbf{P}_m \mathbf{r})\mathbf{r}/r^5 - \mathbf{p}/r^3\},$$

где  $\mu_0$  – магнитная константа;

- На магнитный диполь **P<sub>m</sub>** в поле **B** действует механический момент:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{P}_m \mathbf{B}]$$

- Энергия диполя **P<sub>m</sub>** в поле **B**:

$$W = - (\mathbf{P}_m \mathbf{B})$$

---

# Поле на оси диполя

---

- Поле на оси диполя:

$$\mathbf{B} = (\mu_0/4\pi) 2\mathbf{p}/r^3$$

$$\mu_0/4\pi = 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

---

# Задание №1

---

- Определить расположение северного и южного полюсов магнитного шара*
-

# Магнитное поле Земли.

---

- Магнитное поле Земли соответствует полю однородно намагниченного шара = полю диполя, расположенного в центре Земли.
  - Величина:  
 $B \sim 50 \text{ мкТл} = 0,5 \text{ Гс}$
-

# Где север? Где юг?

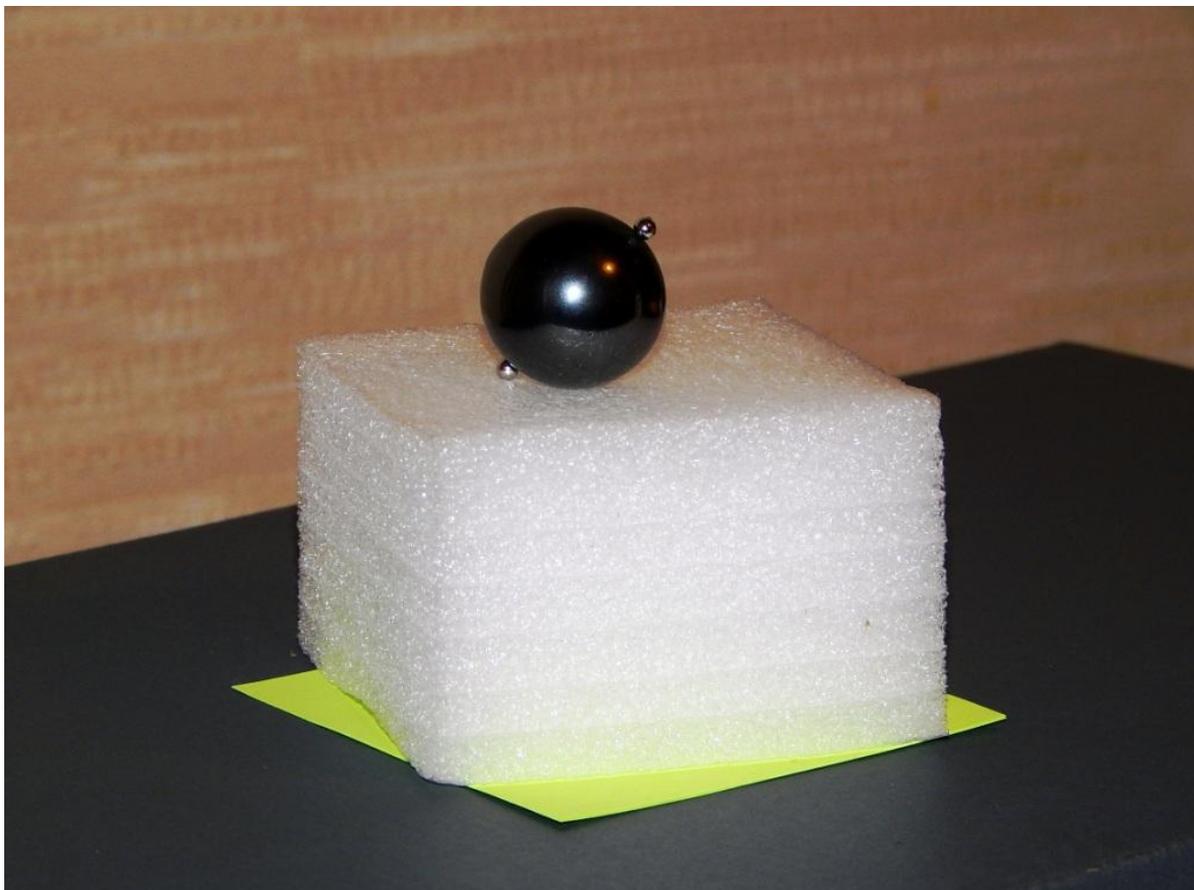
---

Как найти полюса шарообразного магнита?

---

# Решение

---



## Задания № 2, 3

---

- Снимите зависимость максимальной силы сцепления одинаковых шаров от их диаметров  $F(d)$
  - Результаты измерений сравните с теорией
-

Сила сцепления  
магнитных шаров:  
 $F \sim d^2$

---

Шары взаимодействуют как жёсткие точечные диполи!

$$F = -\partial W / \partial r = P_m \partial B / \partial r = -P_m \partial(2P_m / r^3) / \partial r \\ = -(\mu_0 / 4\pi) 6P_m^2 / r^4$$

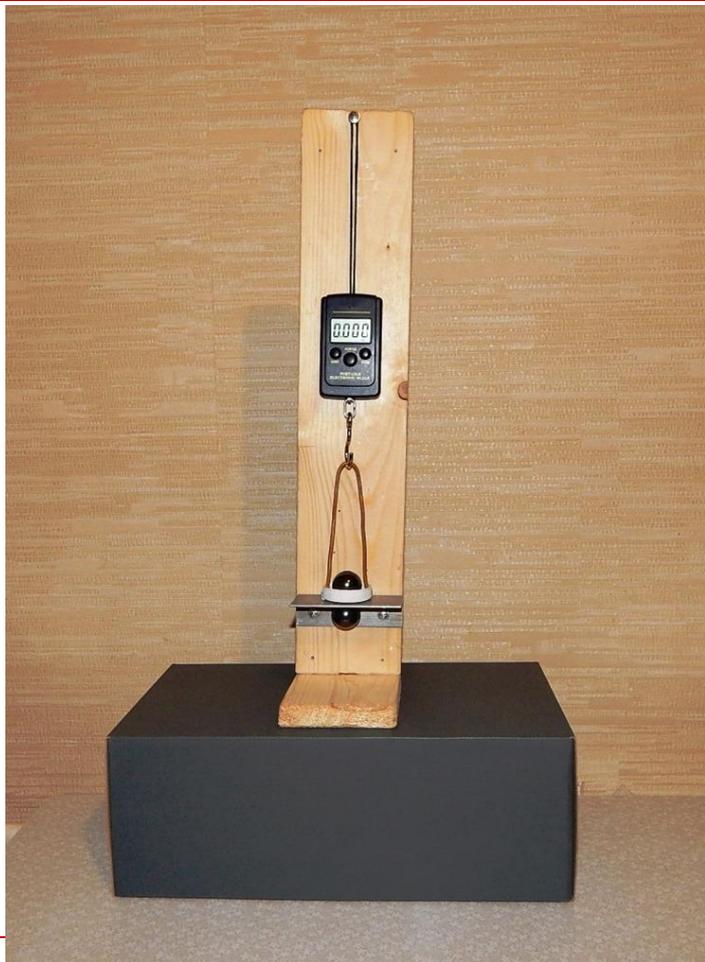
$$F = (\mu_0 / 4\pi) 6P_m^2 / r^4$$

Шары расположены вплотную:

$$F \sim P_m^2 / d^4 = (pV)^2 / d^4 \sim p^2 d^6 / d^4 \sim d^2$$

---

# Экспериментальная установка



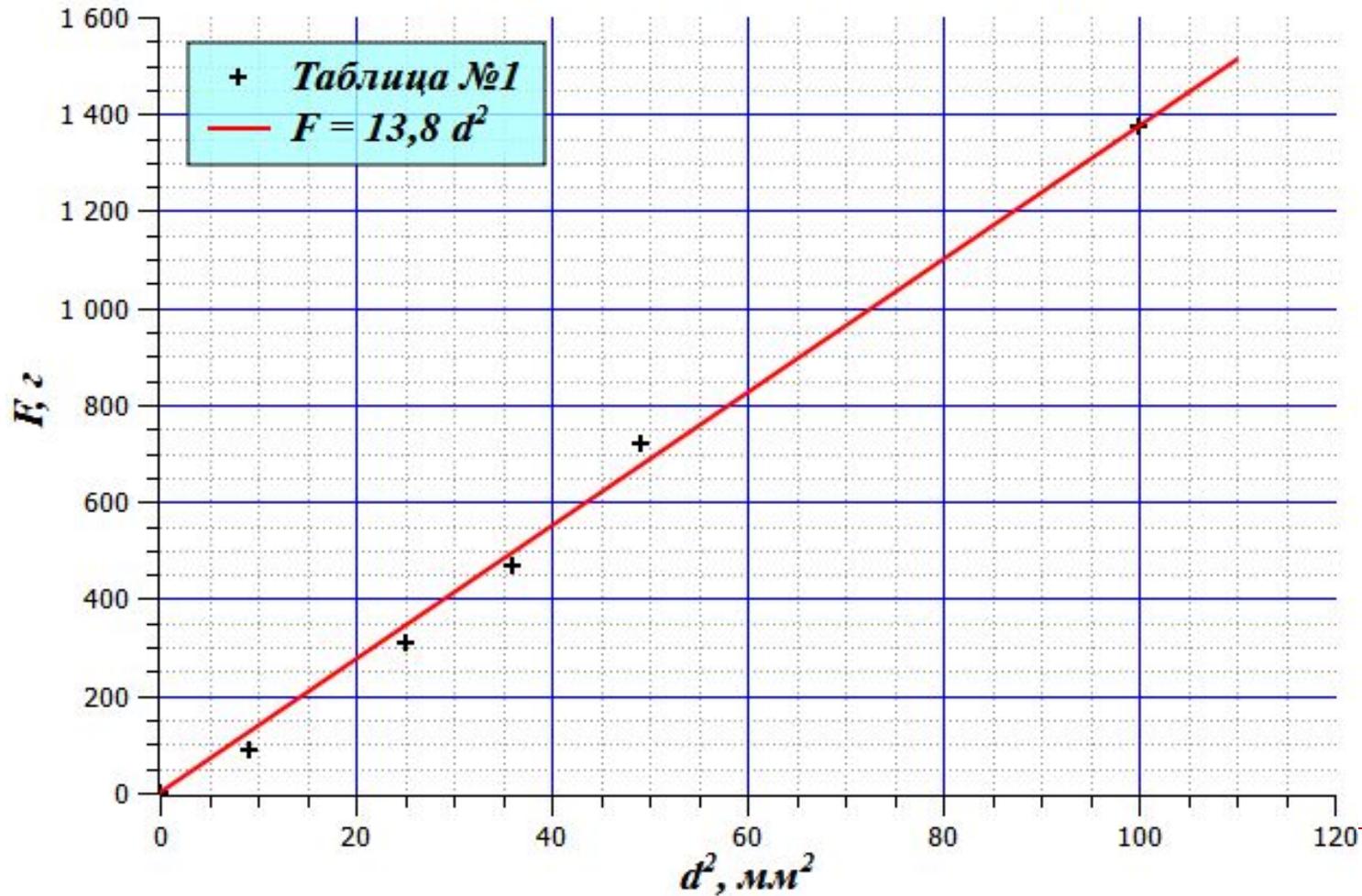
# Эксперимент.

## Таблица № 1 Зависимость $F(d)$

| № | $F, \text{ г}$ | $d, \text{ мм}$ | $d^2, \text{ мм}^2$ |
|---|----------------|-----------------|---------------------|
| 1 | 90             | 3               | 9                   |
| 2 | 310            | 5               | 25                  |
| 3 | 468            | 6               | 36                  |
| 4 | 720            | 7               | 49                  |
| 5 | 1375           | 10              | 100                 |

# Зависимость $F(d)$ : $F \sim d^2$

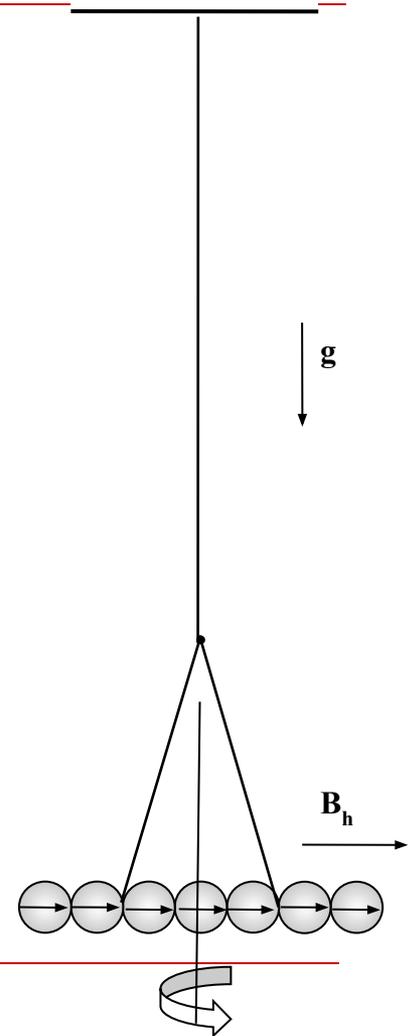
*Линеаризованная зависимость  $F(d)$*



# Лабораторная работа

## Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли

- *Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли методом крутильного маятника*



# Цель работы

---

- Определение величины магнитного момента магнитного шарика;
  - проверка свойства аддитивности для магнитных моментов;
  - определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли
-

# Оборудование

---

- Неодимовые магнитные шары диаметром  $d_2 = 6$  мм (10 штук), набор бумаги для заметок (толщина стопки  $\sim 30$  мм), штатив из немагнитного материала, тонкая нить, штангенциркуль, весы, секундомер.
-

# Параметры шаров

---

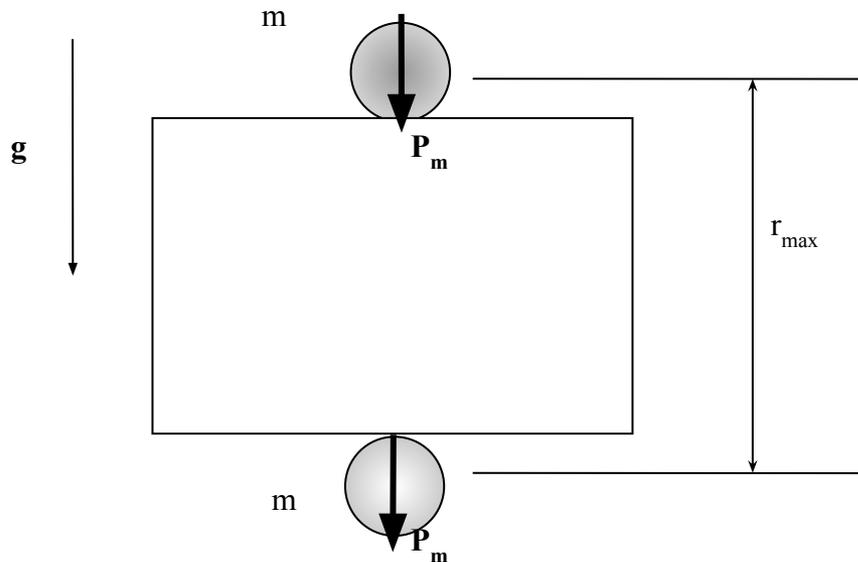
## Магнитные шарики

- $d = 6 \text{ мм}$
  - $m = 0,867 \text{ г}$
  - $\rho_m = 99,6 \text{ мДж/Тл}$
-

# Магнитные моменты шаров

---

□  $(\mu_0/4\pi) 6P_m^2/r_{\max}^4 = mg \rightarrow$   
 $P_m = \{mgr_{\max}^4/6(\mu_0/4\pi)\}^{1/2}$



# Прочность «магнитной цепочки»

□ метод «сцепления»:

$$F_0 = (\mu_0/4\pi) 6P_m^2/d^4$$

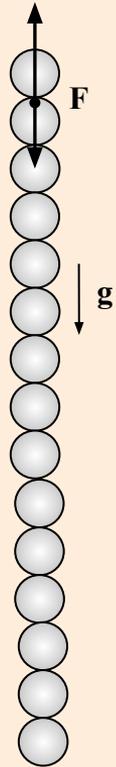
$$Mg = F_0(1 + 1/2^4 + 1/3^4 + 1/4^4 + \dots) \approx 1,08F_0$$

Эксперимент:

$$M = 506 \text{ г} \Rightarrow$$

$$F_0 = \mu_0/4\pi 6P_m^2/d^4 = Mg/1,08 \Rightarrow$$

$$P_m = d^2 \{Mg/1,08(\mu_0/4\pi)\}^{1/2} = 99,6 \text{ мДж/Тл}$$



# Период крутильных колебаний

---

$$I_n d^2\varphi/dt^2 = -P_m B_h \varphi \rightarrow$$

$$I_n \varphi'' + P_m B_h \varphi = 0 \rightarrow$$

период колебаний:

$$T = 2\pi(I_n/P_m B_h)^{1/2} = 2\pi(I_n/nP_m B_h)^{1/2}$$

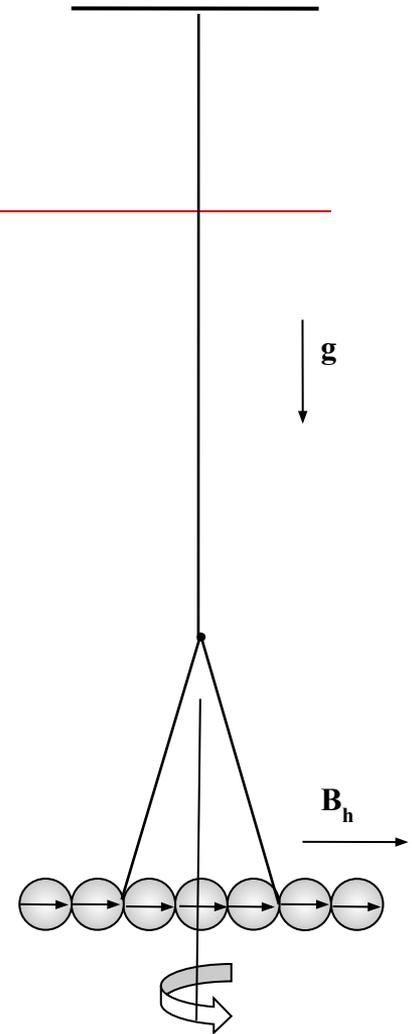
$$I_n \approx 1/12 Ml^2 = 1/12 nm(nd)^2 = n^3 md^2/12$$

$$T(n) = 2\pi(md^2/12P_m B_h)^{1/2} n \rightarrow$$

$$T = kn,$$

$$k = 2\pi(md^2/12P_m B_h)^{1/2}$$

---



# Как учесть упругость нити?

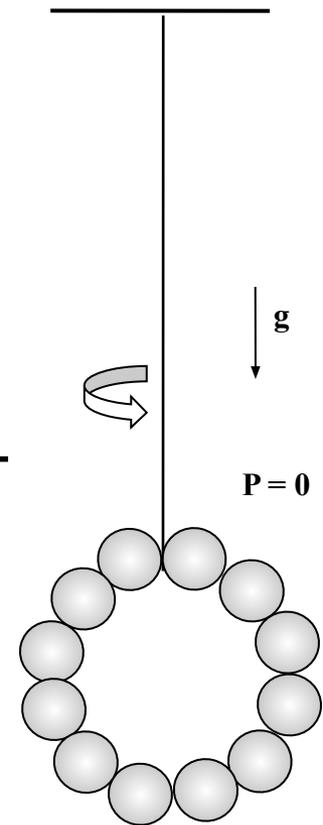
---

**Ответ на следующем слайде**

---

# Решение

- Колебание системы с  $P = 0$  (см. рис.)  $\Rightarrow$  Результат  $T = \infty$
- Выводы:
  - упругость нити на период колебаний практически не влияет
  - Магнитный момент – величина аддитивная



$$I(n) = 1/12 \text{ md}^2 \text{ n}^3$$

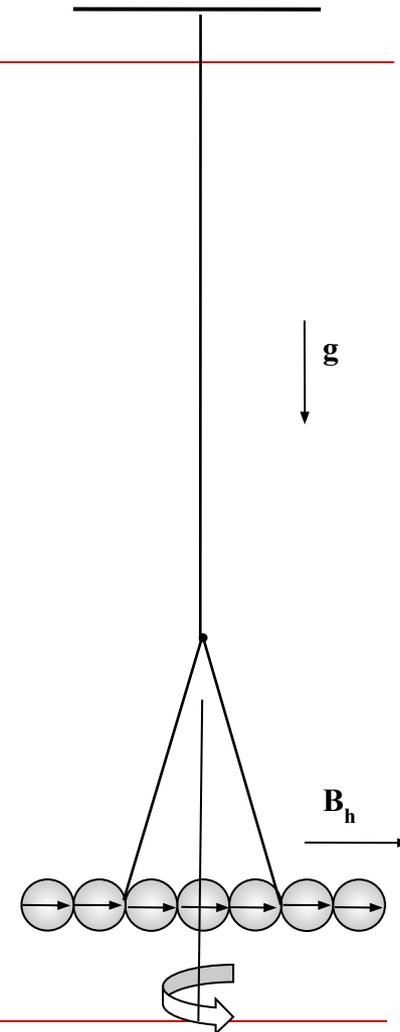
$$P(n) = P_m \text{ n}$$

□  $I_n = 1/12 \text{ M}\ell^2 = 1/12 \text{ nm} (\text{nd})^2 = 1/12 \text{ md}^2 \text{ n}^3$

| n  | I ~                   | I =                  | Δ %    |
|----|-----------------------|----------------------|--------|
| 3  | 2,25 md <sup>2</sup>  | 2,30 md <sup>2</sup> | 2 %    |
| 4  | 5,33 md <sup>2</sup>  | 5,40 md <sup>2</sup> | 1,3 %  |
| 5  | 10,4 md <sup>2</sup>  | 10,5 md <sup>2</sup> | 1 %    |
| 6  | 18,0 md <sup>2</sup>  | 18,1 md <sup>2</sup> | 0,6 %  |
| 7  | 28,6 md <sup>2</sup>  | 28,7 md <sup>2</sup> | 0,4 %  |
| 8  | 42,67 md <sup>2</sup> | 42,8 md <sup>2</sup> | 0,3 %  |
| 9  | 60,75 md <sup>2</sup> | 60,9 md <sup>2</sup> | 0,25 % |
| 10 | 83,33 md <sup>2</sup> | 83,5 md <sup>2</sup> | 0,2 %  |

# ЗАВИСИМОСТЬ $T(n)$

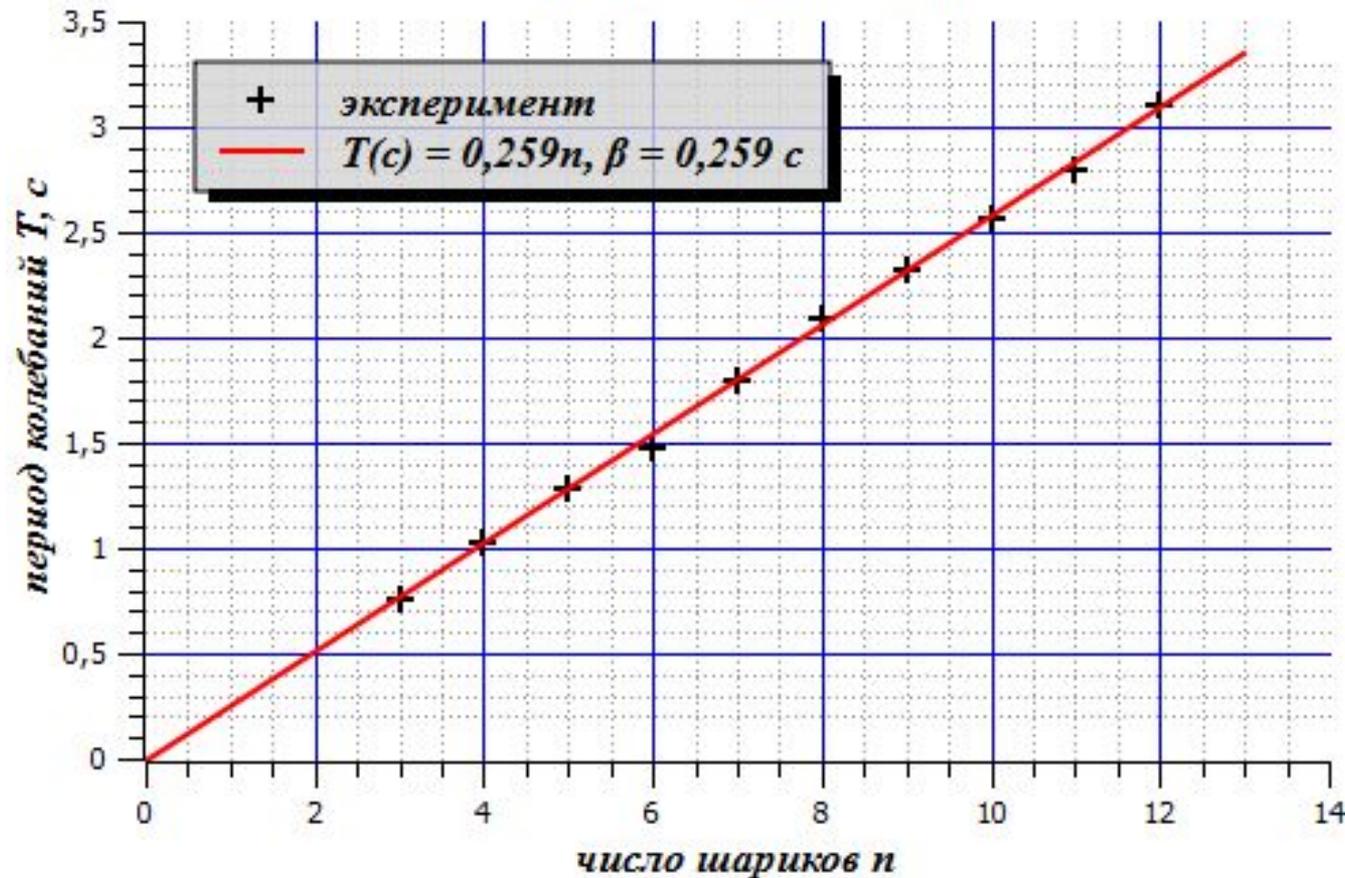
| №  | n  | N   | t, с  | T, с |
|----|----|-----|-------|------|
| 1  | 3  | 150 | 114,2 | 0,76 |
| 2  | 4  | 100 | 102,6 | 1,03 |
| 3  | 5  | 50  | 63,8  | 1,28 |
| 4  | 6  | 50  | 74,2  | 1,48 |
| 5  | 7  | 50  | 90,0  | 1,80 |
| 6  | 8  | 20  | 41,7  | 2,09 |
| 7  | 9  | 20  | 46,4  | 2,32 |
| 8  | 10 | 20  | 51,1  | 2,56 |
| 9  | 11 | 20  | 55,9  | 2,80 |
| 10 | 12 | 20  | 61,9  | 3,10 |



# График $T(n)$

Зависимость периода колебаний от числа шариков

$$T(n) = \beta n, \quad B = 15,3 \text{ мкТл}$$



# Расчёты: $V_h \approx 15,3$ мкТл

---

□  $T = 2\pi(m d^2 / 12 P_m V_h)^{1/2} \quad n = \beta n \Rightarrow$   
 $V_h = 4\pi^2 m d^2 / 12 P_m \beta^2 \approx 15,3$  мкТл

- Табличные значения:  
 $V_{\text{табл}}(\varphi = 50-60^\circ \text{с.ш.}) = 15$  мкТл  
(Физические величины. Справочник под ред.  
И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова,  
Москва, Энергоатомиздат, 1991 г.)
-

Лабораторная работа  
**Вертикальная составляющая  
магнитного поля Земли**

---

- Определение вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли по механическому моменту сил  $M = P_m B_v$
-

# Цель работы

---

- Определение вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли по механическому моменту сил;
  - проверка свойства аддитивности для магнитных моментов шариков;
  - определение магнитного наклона.
  - Сравнение полученных величин с табличными и расчетными значениями.
-

# Магнитное наклонение

---

- Магнитное наклонение – это угол  $\beta$ , который вектор ***V*** образует с горизонтальной плоскостью:  
$$\operatorname{tg}\beta = V_v/V_h$$
-

# Расчётное значение магнитного наклонения

---

□ поле диполя:

$$\mathbf{B} = (\mu_0/4\pi) \{3(\mathbf{P}_m \mathbf{r})\mathbf{r}/r^5 - \mathbf{P}_m/r^3\},$$

$\mu_0$  – магнитная постоянная,

$$\mu_0/4\pi = 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

---

# Расчётное значение магнитного наклонения

---

- Вертикальная составляющая поля:  
$$B_v = 2P_m \cos\theta / R^3$$
  - горизонтальная составляющая поля:  
$$B_h = P_m \sin\theta / R^3 \rightarrow$$
  - $\text{tg}\beta = B_h / B_v = 2\text{ctg}\theta = 2\text{ctg}(90^\circ + \varphi) = -2\text{tg}\varphi$
  - для московского региона ( $\varphi = 55 - 56^\circ$  с. ш.):  
$$\beta = -\text{arctg}(2\text{tg}\varphi) \approx -71^\circ$$
-

# Оборудование

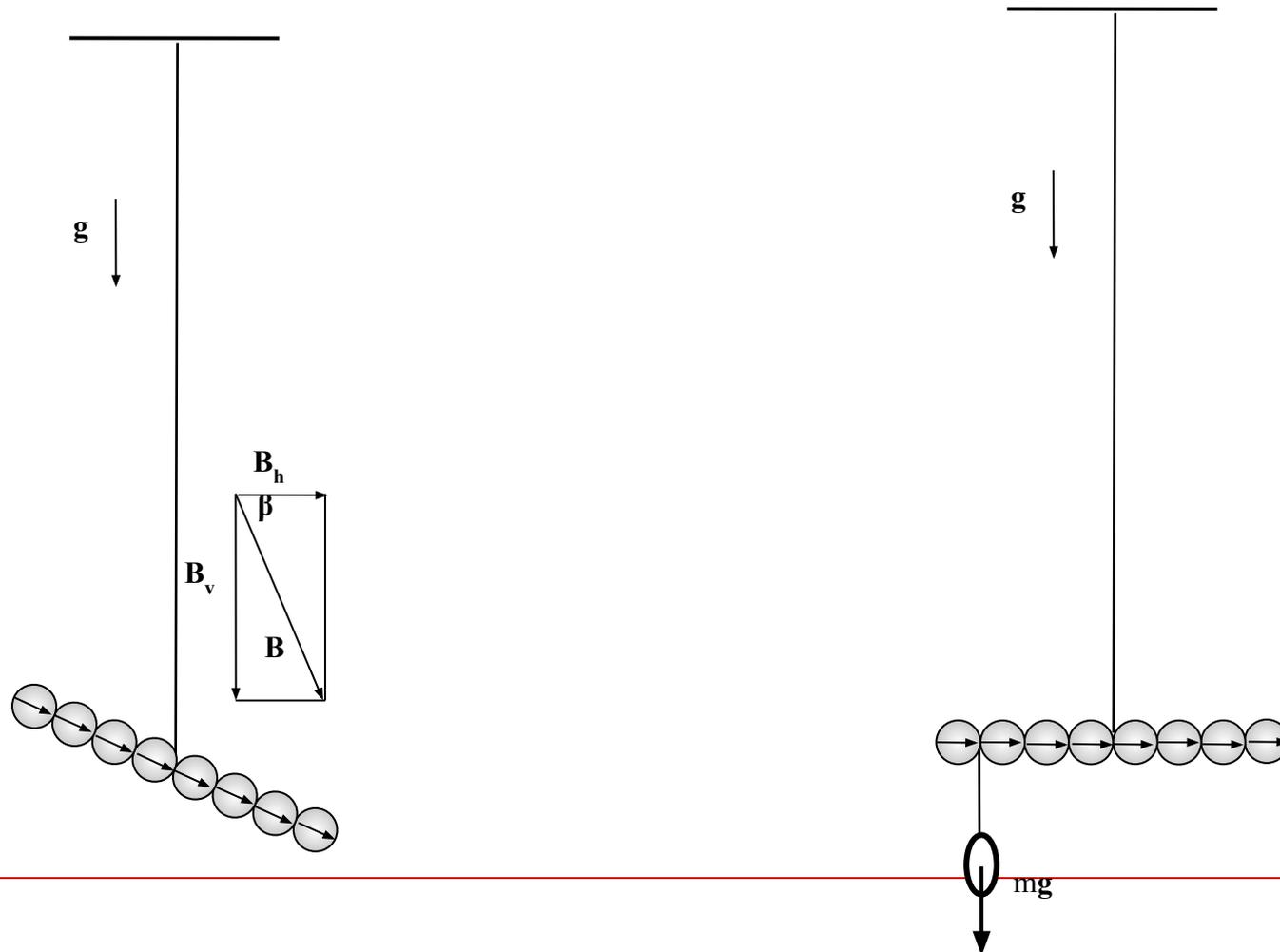
---

- 10 одинаковых магнитных шариков диаметром  $d = 6$  мм; весы; нитка; проволока; штатив из немагнитного материала; ножницы; линейка.

магнитный момент одного шарика диаметром 6 мм  $\rho_m = 99,6$  мДж/Тл.

---

# Схема установки



# Так выглядит реальный опыт



# Эксперимент. Зависимость $M(n)$

$$d = 6 \text{ мм}; P_m = 99,6 \text{ мДж/Тл}$$

| № | $n$ | $l$ , см | $m$ , мг | $r$ , мм | $M$ , мкДж |
|---|-----|----------|----------|----------|------------|
| 1 | 4   | 26,0     | 288,6    | 6,0      | 17,0       |
| 2 | 6   | 21,0     | 233,1    | 12,0     | 27,4       |
| 3 | 8   | 18,6     | 206,5    | 18,0     | 36,5       |
| 4 | 10  | 18,6     | 206,5    | 24,0     | 48,6       |

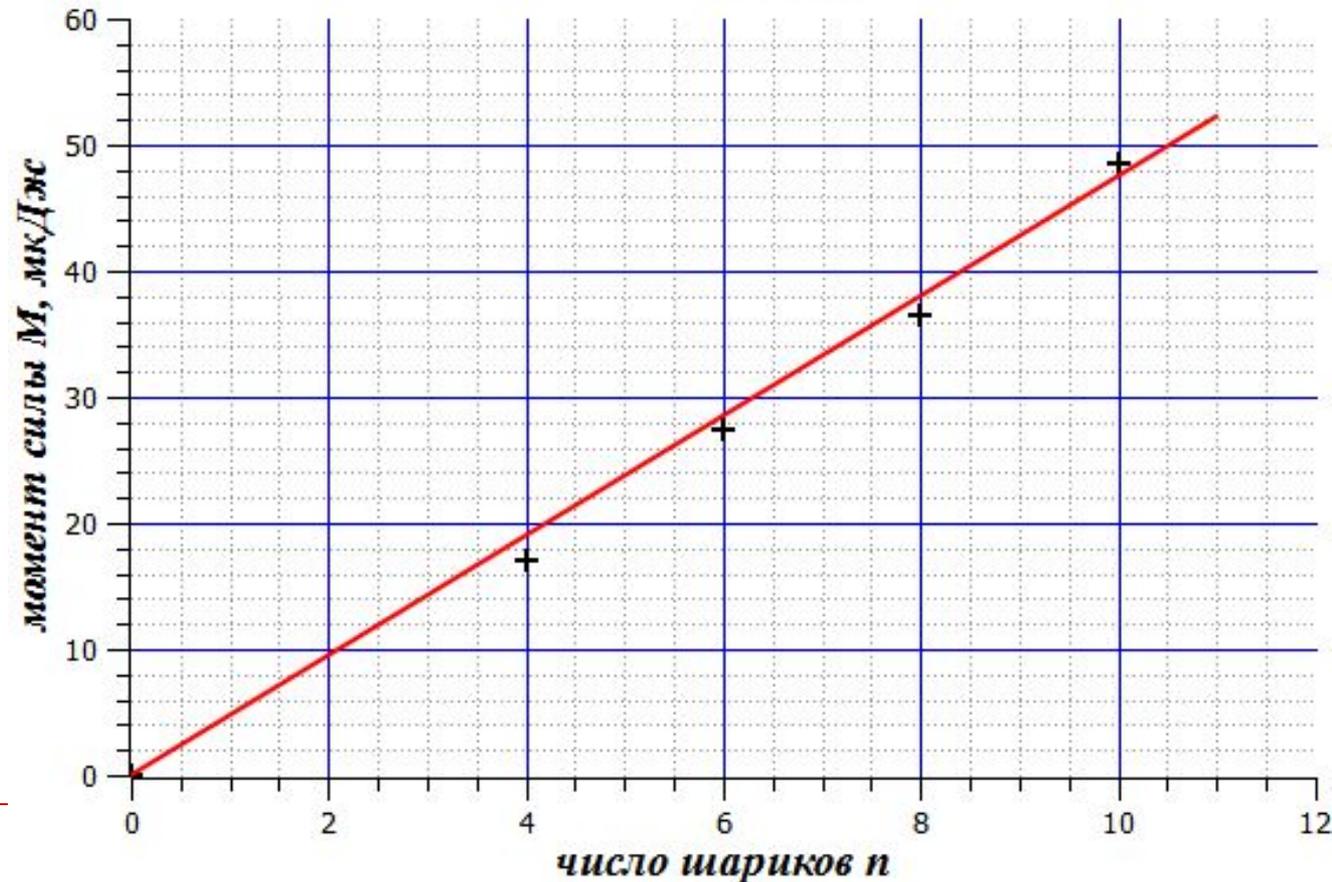
$n$  – число шариков;  $l$  – длина медной проволоки, уравнивающей «стрелку» из  $n$  шариков в горизонтальном положении;  $m = \rho_l l$  – масса проволоки длиной  $l$ ;  $r$  – плечо силы тяжести проволоки  $m$ ;  $M = mgr$  – момент силы тяжести

ПРОВОЛОКИ.

График зависимости  $M(n) = n\rho_m V_v = kn$ ,  $k = \rho_m V_v$

$$V_v = k/\rho_m$$

*Зависимость  $M(n) = 4,75 n$   
 $V = 47,7$  мкТл*



# Результаты

---

- Вертикальная составляющая:  
 $V_v = k/P_m = 47,7 \text{ мкТл}$
  - Горизонтальная составляющая:  
 $V_h = 15,3 \text{ мкТл}$
  - Полное поле:  
 $V = (V_h^2 + V_v^2)^{1/2} = 50,1 \text{ мкТл}$
  - Магнитное наклонение:  
 $\beta = \text{arctg}(V_v/V_h) = \text{arctg}(3,12) = 72,2^\circ$
-

---

ВСЁ.  
СПАСИБО

---